РАСЧЕТ ВЕСА ОБМОТКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ФАЗЫ

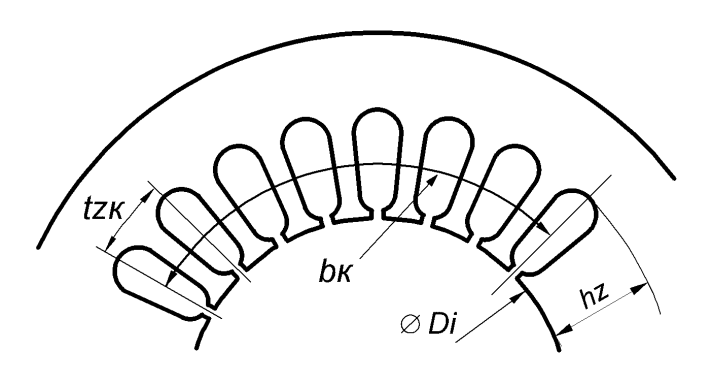
Rev. 03   12 Jan 2024

Размеры в $мм$. Одно зубцовое деление катушки, $мм$. см. рисунок:

$$tz\text{к} = \frac{\pi \times (Di + hz)}{Z}$$

где π – число "пи" (3,14159), Di – внутренний диаметр статора, $мм.$, hz – высота паза, $мм.$, Z – количество пазов. Ширина катушки, $мм.$:

$$b\text{к} = tz\text{к} \times y$$



К определению средней ширины катушки.

где y – принятый шаг обмотки. Так же:

$$b\text{к} = \frac{\pi \times (Di + hz) \times y}{Z} \quad \text{или} \quad b\text{к} = \frac{\pi \times (Di + hz) \times \beta}{2p} \quad \text{или} \quad b\text{к} = \frac{\pi \times (Di + hz) \times \frac{y\text{к}}{y}}{2p}$$

где bк – ширина катушки, $мм.$, Di – внутренний диаметр статора, $мм$. $2p$ – количество полюсов, β – величина сокращения шага, y – полный шаг, yк – принятый (укороченный). Средняя длина одной лобовой части, с учетом расстояния выхода катушки из паза $мм.$:

$$L\text{л} = (1{,}16 + 0{,}14 \times p) \times b\text{к} + 15$$

где p – пар полюсов.
Длина витка обмотки, $мм.$:

$$Lw = (L\text{л} + L) \times 2$$

где L – длина статора, $мм$.
Далее подсчет удобнее вести в метрах, значения Lw в $мм$. необходимо разделить на 1000, смотрите дальнейшие примеры. Общая длина одной фазы (всех витков фазы), *метров*:

$$L\text{ф} = Lw \times w\text{ф}$$

где Lф – длина обмотки одной фазы, Lw – длина витка (одного), wф – витков фазы.
Общая длина всего провода на электродвигатель, на три фазы соответственно:

$$L\text{пм} = Lw \times w\text{ф} \times n \times m$$

где Lпм – общая длина всех проводников мотора, n – проводников в витке, m – количество фаз. Вес всей обмотки:

$$G\text{о} = G\text{из} \times L\text{пм}$$

где Gо – вес обмотки двигателя, Gиз – вес изолированного проводника, берется из справочной таблицы весов обмоточных проводов, ($кг/км$ или $кг/м$)., Lпм – длина обмоточного провода всей обмотки (всех проводов).
Сопротивление фазы постоянному току:

$$R\text{ф} = \frac{\rho \times L\text{ф}}{Sw \times a^2}$$

где ρ – удельное сопротивление металла проводника, медь 0,0175 ($Ом \times мм^2/м.$ при 20°С), Lф – длина обмотки одной фазы, $м.$, Sw – сечение витка, $мм^2$ (сумма сечений всех проводов в витке), a – количество параллельных ветвей в фазе, значение в квадрате.

Пример. Статор Di = 72 *мм.*, L = 60 *мм.*, высота паза hz = 12 *мм.*, пазов статора Z = 24, шаг обмотки y = 10 (1 – 11), витков в фазе wф = 320 (в пазе 80), провод d = 0,63 *мм.* × 1, a = 1, полюсов $2p$ = 2.
Зубцовое деление:

$$tz\text{к} = \frac{\pi \times (Di + hz)}{Z} = \frac{\pi \times (72 + 12)}{24} = 10{,}995 \text{ мм.}$$

ширина катушки:

$$b\text{к} = tz\text{к} \times y = 10{,}995 \times 10 \approx 110 \text{ мм.}$$

или

$$b\text{к} = \frac{\pi \times (Di + hz) \times \beta}{2p} = \frac{\pi \times (72 + 12) \times \frac{10}{12}}{2} \approx 110 \text{ мм.}$$

где β величина сокращения шага, сокращенный шаг y = 10, полный $y = Z/2p$ = 12, величина укорочения шага 10/12 = 0,8333, Di – внутренний диаметр статора, hz – высота (глубина) паза. Длина лобовой части:

$$L\text{л} = (1{,}16 + 0{,}14 \times p) \times b\text{к} + 15 = (1{,}16 + 0{,}14 \times 1) \times 110 + 15 = 158 \text{ мм.}$$

длина одного витка обмотки:

$$Lw = (158 + 60) \times 2 = 436 \text{ мм.}/1000 = 0{,}436 \text{ метров.}$$

Далее подсчет удобнее продолжать в метрах. Длина одной фазы (всех витков фазы), *метров*:

$$L\text{ф} = Lw \times w\text{ф} = 0{,}436 \times 320 = 139{,}52 \text{ м.}$$

здесь же удобнее подсчитать сопротивление одной фазы постоянному току:

$$R\text{ф} = \frac{\rho \times L\text{ф}}{Sw \times a^2} = \frac{0{,}0175 \times 139{,}52}{0{,}31172 \times 1^2} = \frac{2{,}604}{0{,}31172} = 7{,}8326 \text{ Ом}$$

где ρ – удельное сопротивление металла проводника, медь 0,0175 (*Ом*×*мм*^{2}×*м.* при 20°С), Lф – длина обмотки одной фазы, *м.*, Sw – сечение витка (сумма сечений всех проводов в витке), *мм*^{2}., a – количество параллельных ветвей в фазе, если параллельных ветвей нет, то a = 1. Общая длина провода на электродвигатель, на три фазы соответственно:

$$L\text{пм} = Lw \times w\text{ф} \times n \times m = 0{,}436 \times 320 \times 1 \times 3 = 418{,}56 \text{ метров}$$

где n – проводников в витке, m – количество фаз (3).
Вес провода диаметром 0,63 с изоляцией типа ПЭТ155 - 1 *гр./м.* = 2,8723 (или это же вес 1 *км.* в *кг.*) соответственно вес всего обмоточного провода двигателя составит:

$$G\text{о} = G\text{из} \times L\text{пм} = 2{,}8723 \times 418{,}56 = 1202{,}23 \text{ грамм или} \sim 1{,}202 \text{ кг.}$$

или

$$G\text{о} = 2{,}8723 \times 0{,}41856 \text{ км.} \approx 1{,}202 \text{ кг.}$$

где Gо – вес обмотки двигателя, Gиз – вес изолированного проводника (из справочной таблицы обмоточных проводов), Lпм – длина обмоточного провода всей обмотки (всех проводов).

Пример. Di = 73 *мм.*, L = 67 *мм.*, высота паза hz = 13,5 *мм.*, Z = 24, шаг y = 10 (1 – 11), витков в фазе wф = 312 (в пазе 78), провод 0,71 *мм.* × 1 проводник в витке, параллельных ветвей a = 1, полюсов $2p$ = 2.

$$tz\text{к} = \frac{\pi \times (Di + hz)}{Z} = \frac{\pi \times (73 + 13{,}5)}{24} = 11{,}322\ \text{мм.}$$

$$b\text{к} = tz\text{к} \times y = 11{,}322 \times 10 = 113{,}22\ \text{мм.}$$

длина лобовой части:

$$L\text{л} = (1{,}16 + 0{,}14 \times p) \times b\text{к} + 15 = (1{,}16 + 0{,}14 \times 1) \times 113{,}22 + 15 = 162{,}186\ \text{мм.}$$

длина витка:

$$Lw = (162{,}186 + 67) \times 2 = 458{,}372\ \text{мм.}/1000 \approx 0{,}4584\ \text{метров.}$$

Далее подсчет в метрах. Общая длина витков одной фазы, *метров*:

$$L\text{ф} = Lw \times w\text{ф} = 0{,}4584 \times 312 \approx 143{,}021\ \text{м.}$$

сопротивление одной фазы постоянному току:

$$R\text{ф} = \frac{\rho \times L\text{ф}}{Sw \times a^2} = \frac{0{,}0175 \times 143{,}021}{0{,}3959 \times 1^2} = \frac{2{,}50287}{0{,}3959} = 6{,}32\ \ \text{Ом}$$

где ρ – удельное сопротивление металла проводника, медь 0,0175 (*Ом×мм*^{2}*×м.* при 20°С), Lф – длина всей одной фазы, *м.*, Sw – сечение витка, *мм*^{2}, (всех проводов в витке), a – количество параллельных ветвей в фазе (при их отсутствии a = 1).
Общая длина провода на электродвигатель, на три фазы соответственно:

$$L\text{пм} = Lw \times w\text{ф} \times n \times m = 0{,}4584\ \times 312 \times 1 \times 3 = 429{,}0624\ \text{м.}$$

где Lw – длина витка, wф – витков фазы, n – проводов в витке, m – количество фаз.
Вес провода диаметром 0,71 *мм.* с изоляцией типа ПЭТ155 1 *гр./м.* = 3,65 (или то же вес 1 *км.* в *кг.*) соответственно вес всего обмоточного провода на двигатель составит:

$$G\text{о} = G\text{из} \times L\text{пм} = 3{,}65 \times 429{,}0624\ \text{м.} = 1566\ \text{грамм или} \sim 1{,}566\ \text{кг.}$$

или

$$G\text{о} = 3{,}65 \times 0{,}4290624\ \text{км.} \approx 1{,}566\ \text{кг.}$$

где Gо – вес обмотки двигателя, Gиз – вес изолированного проводника (из справочной таблицы, *кг/км.*), Lпм – длина обмоточного провода всей обмотки (всех проводов).
Пример двигатель АИР132М2: Di = 127 *мм.*, L = 130 *мм.*, высота паза hz = 17,7 *мм.*, пазов статора Z = 36, витков в фазе wф = 174 (29 в пазе), шаг обмотки (укороченный) y = 15 (1 – 16), d провода 1,12 *мм.* × 2 проводника в витке, параллельных ветвей в фазе a = 2, полюсов $2p$ = 2. Зубцовое деление:

$$tz\text{к} = \frac{\pi \times (Di + hz)}{Z} = \frac{3{,}14159 \times (127 + 17{,}7)}{36} = 12{,}627\ \text{мм.}$$

ширина катушки (в лобовой части):

$$b\text{к} = tz\text{к} \times y = 12{,}627 \times 15 = 189{,}411\ \text{мм.}$$

длина лобовой части обмотки:

$$L\text{л} = (1{,}16 + 0{,}14 \times p) \times b\text{к} + 15 = (1{,}16 + 0{,}14 \times 1) \times 189{,}411 + 15 = 261{,}2354\ \text{мм.}$$

где p – пар полюсов ($2p/2$ = 2/2 = 1).

Длина витка, *мм.* и *метров*:

$$Lw = (L\text{л} + L) \times 2 = (261{,}2354 + 130) \times 2 = 782{,}4708\ \text{мм.}/1000 \approx 0{,}783\ \text{м.}$$

где Lл – найденная длина лобовой части обмотки, L – длина статора.
Длина обмотки одной фазы (длина всех витков одной фазы, не провода):

$$L\text{ф} = Lw \times w\text{ф} = 0{,}783 \times 174 \approx 136{,}3\ \text{м.}$$

сопротивление Rф фазы постоянному току:

$$R\text{ф} = \frac{\rho \times L\text{ф}}{Sw \times a^2} = \frac{0{,}0175 \times 136{,}3}{1{,}9704 \times 2^2} = \frac{2{,}38525}{7{,}8816} \approx 0{,}303\ \text{Ом}$$

где Rф – сопротивление фазы постоянному току, ρ – удельное сопротивление меди (0,0175 *Ом×мм²×м.* при 20°С), Sw – сечение витка (всех проводов в витке, сечение d1,12 = 0,9852 × 2 проводника в витке = 1,9704 *мм²*), a – параллельных ветвей в фазе.
Длина всех проводов обмотки:

$$L\text{пм} = Lw \times w\text{ф} \times n \times m = 0{,}783 \times 174 \times 2 \times 3 \approx 817{,}45\ \text{метров}$$

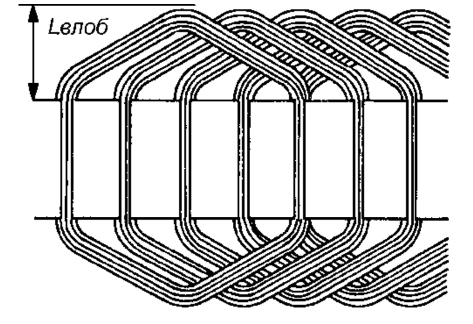
где Lw – длина одного витка, wф – витков в фазе, n – проводников в витке, m – количество фаз (три). Вес провода 1,12 *мм.* с изоляцией (ПЭТ155) = 9,0116 *кг/км.*

$$G\text{о} = G\text{из} \times L\text{пм} = 9{,}0116 \times 817{,}45 = 7366{,}53\ \text{грамм}/1000 \approx 0{,}737\ \text{кг.}$$

где: Gо – вес всей обмотки, Gиз – вес проводника с изоляцией (по справке, *кг/км.*), Lпм – длина провода на весь мотор, длина всех проводов.

Важное замечание. При разных диаметрах проводников в витке весовой подсчет делается раздельно для каждого проводника, а затем суммируется. При этом в формулы весового подсчета подставляются данные каждого проводника отдельно.

Подсчет вылета лобовой части обмотки, расстояние от статора занимаемое обмоткой при высоте h оси вращения двигателя:



h до 132 *мм.*:

$$L\text{влоб} = (0{,}19 + 0{,}1 \times p) \times b\text{к} + 10$$

h более 160 *мм.*:

$$L\text{влоб} = (0{,}12 + 0{,}15 \times p) \times b\text{к} + 10$$

например для h до 132 *мм.*, (пар полюсов p и ширина катушки bк из примера выше):

$$L\text{влоб} = (0{,}19 + 0{,}1 \times p) \times b\text{к} + 10 = (0{,}19 + 0{,}1 \times 1) \times 110 + 10 = 41{,}89 \approx 42\ \text{мм.}$$

Дополнение.

При отсутствии данных веса изолированного провода подсчет веса обмотки возможно рассчитать так же по следующим формулам. Вес *меди* обмотки электродвигателя, *кг.*:

$$G\text{м} = \frac{8{,}93 \times w\text{ф} \times Sw \times Lw \times m}{1000}$$

где 8,93 – удельный вес меди, $г/см^2$, wф – витков в фазе, Sw – сечение витка, $мм^2$ (всех проводников в витке), Lw – длина витка, *м.*, m – количество фаз (3).
Пример. Витков в фазе wф = 174 (29 в пазе), d провода 1,12 *мм.* × 2, сечение d1,12 = 0,9852 × 2 проводника в витке = сечение витка 1,9704 $мм^2$, длина витка Lw = 0,783 *м.* (данные из предыдущего примера):

$$G\text{м} = \frac{8{,}93 \times w\text{ф} \times Sw \times Lw \times m}{1000} = \frac{8{,}93 \times 174 \times 1{,}9704 \times 0{,}783 \times 3}{1000} = 7{,}1918 \text{ кг.} \approx 7{,}2 \text{ кг}$$

Gм – вес *голой* меди обмотки на весь мотор без учета изоляции проводников. Для достаточной практической точности вес с изоляцией проводников составит увеличением на 4% найденного веса голой меди:

$$G\text{миз} = G\text{м} \times 1{,}04 = 7{,}2 \times 1{,}04 \approx 7{,}48 \text{ кг.}$$

Gмиз – вес изолированного провода на весь мотор.
Другая формула подсчета веса, предпочтительная для круглых обмоточных проводов:

$$G\text{миз} = \left[0{,}876 + 0{,}124 \times \left(\frac{d\text{из}}{d\text{г}}\right)^2\right] \times G\text{м}$$

где dиз – диаметр провода с изоляцией, dг – диаметр голого провода, Gм – найденный вес голой меди.
Пример. Диаметр провода dг = 1,12 *мм.* dиз = 1,217 *мм.*

$$G\text{миз} = \left[0{,}876 + 0{,}124 \times \left(\frac{d\text{из}}{d\text{г}}\right)^2\right] \times G\text{м} = \left[0{,}876 + 0{,}124 \times \left(\frac{1{,}217}{1{,}12}\right)^2\right] \times 7{,}2 = 7{,}3613 \text{ кг.}$$

Рассчитанный вес составляет вес обмотки без учета провода на технологический дополнительный расход при ремонте, который может составить 2 – 5%, то есть полученный вес следует умножить на 1,02 – 1,05.
Подсчет сопротивления так же возможен по альтернативной формуле:

$$R\text{ф} = \frac{L\text{ф}}{57 \times Sw \times a^2}$$

где Rф – сопротивление фазы, *Ом*, Lф – длина фазы обмотки, *м.*, 57 – делитель соответствующий удельному сопротивлению меди $Ом \times мм^2/м.$, (1/0,0175 ≈ 57 при 20°C), Sw – сечение витка обмотки (сечение всех проводников в витке), $мм^2$., a – количество параллельных ветвей в фазе. Пример, параллельных ветвей в фазе нет (a = 1), сопротивление фазы:

$$R\text{ф} = \frac{L\text{ф}}{57 \times Sw \times a^2} = \frac{136{,}3}{57 \times 1{,}9704 \times 1^2} = \frac{136{,}3}{112{,}31286} = 1{,}21357 \text{ Ом}$$

при двух параллельных ветвях в фазе:

$$R\text{ф} = \frac{L\text{ф}}{57 \times Sw \times a^2} = \frac{136,3}{57 \times 1,9704 \times 2^2} = \frac{136,3}{449,2512} = 0,303 \text{ Ом}$$

Сопротивление фазы при работе двигателя будет несколько иным. Активное сопротивление фазы статорной обмотки с учетом температуры нагрева обмотки и коэффициентом вытеснения переменного тока:

$$R\text{ф} = \frac{kf \times \rho \times (1 + \alpha \times \Delta t) \times Lw \times w\text{ф}}{Sw \times a^2}$$

где wф – количество витков фазы, Lw – длина витка фазы, *м.*, Sw – сечение витка, *мм*^{2}, удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления меди (ρ = 0,0175 *Ом×м×мм*^{2}, при 20°С, α = 0,004 на 1/С°). Так, для рабочей температуры обмотки 75°С (Δt = 75°С – 20°С = 55°С) и значении коэффициента вытеснения тока для 50 *гц* kf = 1,05, для предидущего примера:

$$R\text{ф} = \frac{1,05 \times 0,0175 \times (1 + 0,004 \times 55) \times 0,783 \times 174}{1,9704 \times 2^2} = 0,3875 \text{ Ом}$$

Литература

Голдберг О. Д., Гурин Я. С., Свириденко И. С. "Проектирование электрических машин" 1984, стр. 133, 134.
Гурин Я. С., Кузнецов Б. И. "Проектирование серий электрических машин", 1978, стр. 191.
Кацман М. М. "Расчет и конструирование электрических машин", 1984, стр. 80.
Копылов И. П. "Проектирование электрических машин", 1980, стр. 196, 197.
Жерве Г. К. "Расчет асинхронного двигателя при ремонте", 3е изд. 1959, стр. 83 – 86, 92 – 94.
Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г., "Справочник по элементарной физике", 1972, стр. 37, 138.